Le réseau hydrographique : propagation, entraînement, transfert/transport

The hydrographic network : propagation, sediment transport, transfer/transport

par Philippe Belleudy

Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement,
E.N.S d'Hydraulique et de Mécanique, I.N.P. de Grenoble,
SOGREAH

Flood propagation and sediment transport differ by their characteristic time scale. As a consequence, flood damages are more familiar than morphological evolution, which remains more often a domain for the specialist. The objective of this paper is to show, through some examples, how much these two domains are interrelated, and to convince that flood hazard protection must take into account sediment transport and morphological consequences.

I ■ RAPPELS SUR LA PROPAGATION

L'écoulement d'un fluide à surface libre est réglé par des principes de continuité de la quantité de mouvement et de la masse fluide. Les équations de Barré-de-Saint-Venant sous leur forme intégrale expriment ces principes avec certaines hypothèses relativement bien vérifiées dans le cas de l'écoulement des fleuves et rivières. On retrouve dans ces équations les propriétés de la propagation dans les réseaux à surface libre pour des phénomènes très divers.

La propagation des ondes raides met en jeu des phénomènes d'inertie importants. Pour ce qui est de la célérité de propagation, c'est le domaine du classique $\sqrt{gh}$. A la limite de validité des hypothèses originales de Barré-de-Saint-Venant, on retrouve la propagation des ondes de rupture. C'est aussi la célérité de propagation des ondes lors de manœuvres dans les canaux à surface libre. L'analyse des directions caractéristiques [1][2] démontre aussi les propriétés que l'on connaît des écoulements "fluviaux" (subcritiques) et "torrentiels" (supercritiques).

A l'inverse, une moindre importance des termes d'inertie permet le développement de méthodes simplifiées. Ces formulations, dites de "l'onde diffusive" et de "l'onde cinématique", trouvent une application directe pour la régulation [3] ou encore pour décrire de façon simplifiée la propagation d'une onde de crue dans un cours d'eau.

1.1. ● Propagation d'une onde de crue

L'équation de l'onde cinématique assimile les frottements à ceux du régime uniforme. Elle permet d'évaluer la célérité de propagation d'une "information" de débit dans la rivière, par exemple la célérité de propagation de la pointe de la crue. Cette relation, certes approximative, relie directement la célérité aux caractéristiques géométriques de la rivière : forme de la section et débitance. On montre en conséquence que cette célérité C est directement reliée à la vitesse moyenne de l'écoulement V (voir par exemple Vreugdenhil [2]) :

$$C = k (b/b_s) V$$

Equation 1 - célérité de propagation de la pointe de débit, où b est la largeur de la partie du lit où se concentre l'écou-

1. Section type, le rapport hauteur/largeur = 1/20.

Essai	sous-section 1	sous-section 2	sous-section 3
1. Etat naturel	galets : $k_{str} = 30$	végétalisé $k_{str} = 10$	rugosité équivalente $k_{str} = 10$
2. Endiguement	idem	végétalisé $k_{str} = 10$	protégé de la submersion par une digue
3. Endiguement et dégagement de la végétation	idem	la végétation est supprimée : $k_{str} = 30$	

Tableau 1 - Propagation d'une onde de crue : essais réalisés.

lement, b_s , la largeur totale du plan d'eau et k , un coefficient qui dépend des caractéristiques géométriques de la section et de la relation de perte de charge utilisée.

Ces propriétés sont vérifiées sur des hydrogrammes réels ; elles se superposent cependant aux phénomènes induits par le réseau hydrographique, dont la production du bassin versant intermédiaire intercepté.

Les simulations numériques présentées ci-après montrent la propagation d'une onde de crue dans une rivière schématique de section triangulaire composée (figure 1) et de pente uniforme $S_0 = 0,001$.

Les essais réalisés sont résumés dans le Tableau 1.

Les calculs résolvent les équations unidimensionnelles de Barré-de-Saint-Venant. Le caractère non-uniforme de la vitesse d'écoulement dans la section en travers est prise en compte par un coefficient de Boussinesq calculé à partir des débitances de chacune des sous-sections [4][5]. Les résultats sont résumés sur les figures 2 et 3.

2. Déformation de l'hydrogramme.

3. Hauteur d'eau.

On retrouve dans chacun des cas la relation de proportionnalité entre la célérité C et la vitesse moyenne du courant V (équation 1). La célérité de propagation de l'onde de crue est évidemment plus rapide dans un lit endigué. Le coefficient k calculé est ici de l'ordre de 1,5, identique à la valeur "théorique" en canal triangulaire avec la formule de Manning/Strickler. La suppression des déversements et des écoulements dans le lit majeur diminue l'écrêtement et provoque une surélévation du niveau en crue de 1,58 m dans ce calcul.

Le dégagement de la végétation du lit mineur modifie légèrement la vitesse d'écoulement et très peu la célérité de propagation de la crue (figure 2). L'effet majeur de cette mesure est d'augmenter la débitance de la section d'écoulement et de permettre l'écoulement du débit avec une moindre hauteur d'eau (-0,88 m ici). A l'inverse, et en anticipant les conclusions de cet article, notons que les niveaux atteints en crue seront rehaussés si des perturbations de l'équilibre sédimentologique provoquent une végétalisation partielle du lit. Cette démonstration s'appuie cependant sur des calculs où des simplifications importantes sont faites (hypothèse unidimensionnelle en particulier) ; les propriétés mises en évidence ici devront être confirmées par des observations de terrain et par des simulations plus rigoureuses.

On peut donc déterminer les temps caractéristiques de propagation d'une crue dans une rivière de façon relativement précise. Pour la faisabilité et la mise au point d'un schéma d'alerte et de prévention, on ajoutera les hypothèses et les temps caractéristiques pour la formation de l'hydrogramme de crue en amont. Il faut cependant remarquer que ces derniers éléments sont ceux pour lesquels l'incertitude est généralement la plus grande.

Dans les cas les plus favorables, l'échelle de temps de cette annonce sera de l'ordre du mois (par exemple pour les fleuves soumis à un régime de crue saisonnier). Elle est plus couramment de l'ordre de la journée ou même de quelques heures. Quant à la durée du phénomène, elle est souvent similaire à celle dont on dispose pour sa préparation.

II ■ PROPAGATION D'UNE "ONDE" SÉDIMENTAIRE

2.1. ● Différents types de transport

Selon l'intensité de la turbulence, les sédiments se déplacent avec l'écoulement en restant plus ou moins proches du fond de la rivière. Le transport par charriage concerne les particules les plus volumineuses. La vitesse propre du "grain" en transport est très variable, en tous cas inférieure à la vitesse de l'écoulement. Entre ces "sauts", le grain est au

repos et sa vitesse moyenne est sûrement très faible. Un marquage magnétique décrit par Newson et Leeks [6] montre des vitesses maximales de 100 mètres en 15 jours au cours de phénomènes de crues. Les expériences réalisées avec des marqueurs indiquent aussi en général une grande dispersion des particules qui ont été retrouvées. On distingue aussi plus loin ces différentes vitesses avec la célérité de propagation des "formes" constituées par ces sédiments.

Les particules les plus petites sont généralement transportées en suspension. Ces matières en suspension (MES) sont présentes dans la veine fluide elle-même. Elles se déplacent sensiblement avec la même vitesse que le courant, donc nettement plus rapidement que les particules solides en charriage. Les flux transportés en suspension sont aussi nettement plus importants que les flux par charriage (voir par exemple Bravard et Petit [7]). Mais dans les cas courants, ce transport sédimentaire n'interagit pas avec le fond de la rivière et transite seulement dans le bief considéré ("wash-load").

2.2 ● Les directions caractéristiques

A partir d'une formulation simplifiée de ces différents transports, on peut faire une analyse mathématique des directions caractéristiques des phénomènes, similaire à celle évoquée ci-dessus pour les équations de l'écoulement seules. Les équations du transport sédimentaire induisent chacune une "direction caractéristique" qui exprime la propagation d'un "invariant" (une fonction des variables d'état) avec une certaine célérité. De telles analyses sont présentées par Cunge et al. [1] en charriage, Rahuel [8] et Sieben [9] pour des analyses plus complètes.

Pour le transport en suspension, on retrouve le caractère intuitif de la convection d'un traceur par un écoulement, c'est-à-dire un déplacement à la vitesse moyenne de l'écoulement.

Pour le transport par charriage, ces travaux montrent en particulier que l'équation de continuité solide (équation d'Exner) propage les "ondes solides" (la hauteur du dépôt pour s'exprimer de façon très simplifiée). La célérité C_s de propagation de ces ondes est bien inférieure à la célérité de propagation des ondes liquides C^* . Cette propriété, ainsi qu'une relative indépendance de l'écoulement permet un calcul découplé du transport solide dans de nombreux cas.

$$C_s = -\frac{V \frac{\partial G_v}{\partial V} - h \frac{\partial G_v}{\partial h}}{h(1 - F_r^2)} \ll C^* = V + \sqrt{gh}$$

Equation 2 - célérité de propagation de l'onde solide.

4. Dépôt à l'amont d'un seuil : profils en long.

5. Dépôt à l'amont d'un seuil : évolution du dépôt.

Cette expression est établie ici avec une granulométrie uniforme et pour une géométrie simplifiée (canal rectangulaire). V est la vitesse moyenne de l'écoulement, h est la profondeur d'eau, F_r est le nombre de Froude et G_v le débit solide par unité de largeur. Cette expression indique aussi qu'en écoulement fluvial (subcritique) cette caractéristique est orientée de l'amont vers l'aval. En écoulement supercritique seulement la direction caractéristique induite par l'équation d'Exner propage l'onde solide depuis l'aval vers l'amont. Les implications sont directes pour la simulation numérique : pour la nécessité des conditions aux limites et pour le choix de certains paramètres numériques. Elles le sont aussi pour la compréhension des perturbations dans une rivière. Les phénomènes de dépôt régressif ou d'érosion régressive sont toujours la conséquence de la propagation vers l'amont d'une propriété hydraulique imposée à l'aval. Par exemple, dans une rivière en régime fluvial, un seuil fixe le profil de la rivière par son influence sur les conditions de l'écoulement, c'est-à-dire de façon indirecte.

2.3 ● Les rythmes d'évolution de la rivière

La cinétique des variations de profil, en relation avec les perturbations subies par la rivière (hydrologiques, topogra-

phiques ou d'alimentation) peut être directement rapprochée de ces considérations théoriques. On montre ici la cinétique de constitution de variation du profil à l'amont d'un déversoir qui conduit à la constitution de la "pelle" c'est-à-dire de la dénivelée (positive ou négative) entre la cote du fond à l'amont immédiat du déversoir et la cote de déversement.

A l'aval d'un tronçon de rivière de section prismatique rectangulaire (largeur $b = 60$ m), on construit un déversoir à la cote $y_s = 2$ m et de largeur déversante $b_s = 100$ m. Pour les conditions de débit simulées, le déversoir fonctionne en régime dénoyé (pas d'influence aval).

Le tronçon de rivière continue à recevoir en amont la charge solide qui correspond aux conditions de transport (formule de Meyer-Peter & Müller, taille des sédiments $d_m = 30$ mm). La pente initiale du fond est $S_0 = 0,001$. La figure 4 montre la ligne d'eau et le fond initiaux (courbes en pointillés) ainsi que le dépôt progressif des sédiments jusqu'à la constitution d'un équilibre correspondant à des conditions uniformes d'entraînement.

Le dépôt se constitue progressivement (de l'amont vers l'aval) et s'engraisse aussi du fait de la réduction de la pente de frottement, qui se déplace de l'aval vers l'amont. La figure 5 montre la cinétique de variation du fond en différents points. Le front du dépôt progresse à une célérité comprise entre 600 m/an et 60 m/an (à la fin de la simulation, l'engraissement du lit concerne une longueur plus importante). Le calcul est réalisé ici avec un débit constant ($Q = 400$ m³/s). Une cinétique réelle sera bien entendu liée aussi à la fréquence des "débits transportants".

C'est la même cinétique qui règle le renouvellement des matériaux constitutifs des bancs. On doit cependant la dissocier en général de la migration même du banc ou des formes du lit (méandres) qui correspond en fait à une cinétique plus lente de variations des conditions de dépôt ou d'érosion. Parmi les cas extrêmes de mobilité citons la progression des bancs alternés du Rhin supérieur (150 à 400 m/an selon l'hydraulicité, cité par Jaeggi [10]).

La diversité des caractères hydrologiques et sédimentologiques dans les différentes parties du bassin versant implique des cinétiques différentes, mais nécessairement liées. Aux torrents dont l'activité sédimentaire est brutale et dans certains cas déconnectée des apports hydrologiques, succèdent les rivières torrentielles actives quelques dizaines de jours par an

puis les rivières de plaine divagantes qui peuvent charrier des alluvions plus de 100 jours par an, de façon directement liée à la capacité de transport conférée par l'écoulement [11]. A l'amont comme à l'aval, la "qualité" des matériaux, c'est-à-dire leur granulométrie, ajuste le transport effectif à la charge solide provenant de l'amont et aux conditions d'entraînement.

Enfin on rappellera le caractère particulier du transport en suspension. Il se propage effectivement avec la vitesse de l'écoulement mais interagit rarement avec le lit de la rivière. Les flux transportés sont cependant tels que les dépôts, quand ils se constituent, sont parfois réalisés avec des cinétiques spectaculaires [12].

2.4 ● Les échelles de temps

Les échelles de temps des variations morphologiques peuvent alors être précisées. Ces différentes échelles de temps sont résumées dans le diagramme de la figure 6.

— L'échelle géologique. La régularisation naturelle du profil en long de la rivière se réalise à un rythme imperceptible à l'échelle humaine. Le profil d'équilibre habituellement présenté – pente et granulométrie décroissantes de l'amont vers l'aval – n'en est qu'une photographie instantanée [13].

— Le siècle. Les autres phénomènes sont une réponse plus ou moins rapide à des perturbations du système. A la limite supérieure de cette échelle "humaine", on citera "l'onde sédimentaire" de la propagation des variations d'alimentation associées à la fin du petit âge glaciaire. Plus généralement, c'est l'échelle de temps correspondant aux réactions du cours d'eau aux perturbations anthropiques de grande échelle. Cette échelle est liée aussi à l'échelle spatiale de ces perturbations, de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres. On citera par exemple l'étude morphologique du Danube en Bavière où la perturbation des alimentations solides provoque une évolution du profil du fleuve pendant plusieurs décennies avant la réalisation d'un pavage [14].

On citera aussi le retour à un équilibre de la Loire bourguignonne après les aménagements (navigation, seuils de prise d'eau) réalisés au XIX^{ème} siècle, tout en remarquant que ce nouvel équilibre est différent de l'état initial. A l'opposé, les extractions massives de matériaux du lit (dont le volume équivaut à plusieurs siècles de flux solide) demanderont un temps de relaxation beaucoup plus important.

Si la perturbation persiste ou si elle a profondément modifié

6. Les échelles de temps caractéristiques des variations morphologiques (hachures) et des événements hydrologiques (en noir).

le caractère de la rivière (par exemple passage d'un lit en tresse à un lit unique et végétalisation des banquettes latérales), le nouvel équilibre sera dans certains cas très éloigné (pente, largeur du lit, niveau de crue) de l'état initial.

— L'année. Les respirations du lit, par exemple à la confluence avec un torrent, sont au rythme des apports. L'échelle de temps est alors de quelques années. Elle peut devenir saisonnière dans le cas d'apports plus régulés, mais différenciés. On observe par exemple une grande régularité dans la formation puis la destruction d'un banc au confluent de l'Isar (apports importants, crues d'automne) et du Danube (crues de printemps). C'est aussi l'ordre de grandeur du temps dont a besoin la rivière pour "gommer" les actions anthropiques locales, limitées en volume et qui ne sont pas renouvelées, par exemple un curage.

— La crue. Enfin on trouvera des phénomènes "sédimentologiques" concomitants des crues. On rappellera une des caractéristiques même du transport sédimentaire par charriage qui est sa relative rareté : les conditions de transport ne sont réunies que pendant les crues. A l'amont du réseau hydrographique, on citera le calibrage du lit que réalise la crue. Des érosions intenses se produisent, et la constitution de dépôts massifs et brutaux là où les conditions le permettent (plages de dépôt naturelles). Des apports exceptionnels des versants, ou un événement extrême, peuvent même modifier le caractère stabilisé de la rivière.

Les événements exceptionnels mobilisent une plus grande partie du lit et permettent la destruction de formes "stabilisées" (bancs, pavage statique) ou le "piégeage" du transport en suspension dans les bancs perchés végétalisés (en augmentant encore leur impact négatif sur les phénomènes de crues). Le retour à l'équilibre demande parfois plusieurs décennies.

Cependant les phénomènes locaux de destruction et d'érosion ou à l'opposé des atterrissements de grande ampleur accroîtront la perception du phénomène sédimentaire.

III ■ CONSÉQUENCES

Le même système fluvial réagit donc à des échelles parfois si différentes que l'on a longtemps séparé les méthodes, les préoccupations et les intérêts liés à l'écoulement (la crue, les endiguements, la navigation), de ceux relatifs au domaine sédimentaire (les extractions de matériaux, la divagation, la protection des berges).

3.1 ● La méthodologie des études

On a déjà évoqué la possibilité, dans de nombreux cas, de découpler le calcul de l'écoulement du calcul sédimentaire. Cette simplification n'est pas seulement le fait des calculs numériques, voir par exemple [15], elle est aussi comprise dans la notion de "débit dominant" qui est récurrente dans les études sédimentaires [6], mais qui est aussi très simplificatrice [16]. Dans le cas de topographies complexes (bras secondaires, ouvrages), on préférera une analyse conjointe de conditions d'écoulement et d'érosion/dépôt caractéristiques (mise en fonctionnement de déversements, participation progressive des bras secondaires) et de la fréquence hydrologique de ces événements. L'étude des ouvrages de navigation de la Loire illustre cette méthodologie [17].

3.2 ● La perception des phénomènes

A l'urgence et à la rapidité de l'onde liquide, il faut associer la perception même du phénomène et la demande d'action qui en résulte. De cette perception aiguë découlent des décisions rapides ; les actions annoncées sont souvent spectaculaires et la réglementation est parfois extrême (règle du "zéro impact" par exemple).

La perception du phénomène sédimentaire est en comparaison généralement faible, en proportion directe de sa lenteur apparente. L'équilibre sédimentologique d'une rivière pris comme état de référence dans les études d'ingénieurs est l'état préexistant aux grandes perturbations du XX^{ème} siècle. Cette référence néglige donc la lente évolution à l'échelle des temps géologiques ou historiques ou encore le fait que la rivière ait parfois retrouvé un équilibre relatif plusieurs décennies après une perturbation anthropique majeure.

Cette perception dépend aussi du type du cours d'eau, et donc de l'ampleur des phénomènes sédimentaires. Elle est faible pour les fleuves de plaine ; la demande conséquente des riverains est exceptionnelle, le plus souvent liée à une attaque ponctuelle de berge. La relation entre la crue et le transport sédimentaire est plus aiguë quand le caractère divagant du cours d'eau est plus affirmé. Le riverain fait souvent la relation entre la diminution de la section et de la capacité d'écoulement et le relèvement des niveaux en crue. Dans le cas où cette variation de section d'écoulement est due à un atterrissement, un curage sera demandé.

3.3 ● Principes d'action...

On comprend la nécessité absolue d'action contre les crues. Il importe cependant que l'action décidée dans l'urgence respecte les équilibres futurs. Le traitement des atterrissements peut être donné en illustration [11].

Un atterrissement, que l'on peut définir comme un banc "anormalement développé" (figures 7a et 7b), diminue la section d'écoulement. Il provoque donc un exhaussement du niveau à l'amont. Il occasionne aussi parfois, de par la moindre section d'écoulement et la déviation du courant, une fragilisation ou une érosion des berges. Le curage d'un tel

7a. Atterrissement au confluent d'un torrent (vue en plan).
7b. Profil en long.

atterrissement devra être envisagé dans l'urgence s'il provoque un relèvement des niveaux intolérable ou s'il modifie à ce point les conditions d'écoulement que son volume augmente (dépôt régressif) ou encore que son ampleur fasse craindre sa fixation.

Le curage systématique de cet atterrissement est souvent inutile et néfaste. Inutile si l'on tente de s'opposer à une tendance systématique : le phénomène se reproduira à chaque crue à l'identique ; il convient plutôt dans ce cas de faciliter le transit en modifiant localement les conditions d'écoulement. Nuisible dans le cas où ce curage serait répété chaque fois qu'il est nécessaire parce que l'on créera alors un déficit sédimentaire analogue à celui des anciennes exploitations d'extraction de granulats dans le lit mineur. Le traitement de chaque cas repose alors sur un diagnostic sédimentologique particulier.

Toute action de lutte contre les inondations, et en général d'aménagement de la rivière, devra donc être conduite en ménageant l'héritage sédimentaire, localement mais aussi en respectant les équilibres longitudinaux de la rivière, et la continuité du transport solide.

Enfin il convient de ne pas négliger les actions d'entretien de la rivière, sans se limiter à l'entretien des berges mais en veillant à la "santé" du lit mineur en maintenant sa capacité à écouler les crues.

3.4 ● ... et nécessité de recherche

Une meilleure compréhension du fonctionnement du système fluvial est nécessaire. Elle combinera la connaissance du terrain, de la biologie et de l'écologie spécifiques de ces milieux et aussi de l'hydrologie et de la mécanique des écoulements et des transports sédimentaires.

A l'amont du bassin versant, on reste relativement démuné pour évaluer la formation et la propagation de la crue. On peut rappeler en illustration le "dilemme" de l'ingénieur quand il cherche à fixer la limite entre une modélisation "naïve" des versants amont et une modélisation déterministe du réseau hydrographique en aval.

La formation et la propagation des phénomènes extrêmes sont encore mal connues. Par exemple les conditions de la transition entre un débordement dans le lit majeur et la généralisation de l'écoulement dans l'ensemble du lit majeur, la modélisation se heurtant aussi dans ce cas à la quasi-impossibilité de calage et de validation due à l'absence d'observations.

Cette compréhension doit relier l'ensemble des échelles spatiales et temporelles, en reprenant la schématisation citée par Newson et Leeks [6], celles du géomorphologue (les siècles, les versants), et celles de l'ingénieur (la rivière et son aménagement, les décennies, la crue).

Les relations entre la crue et la modification topographique doivent être approfondies, en particulier quand elles mettent en jeu des domaines complexes (zones d'écoulement secondaire, berges) [18].

Les conditions de colonisation de la végétation doivent être rapprochées des analyses hydrologiques (fréquence de submersion, de remaniement des matériaux). Cette compréhension doit intégrer les conditions de destruction des atterrissements et des berges végétalisées, avec comme application directe la recherche ou la préservation de situa-

tions d'auto-entretien, la définition des actions d'entretien minimales et la protection contre la formation d'embâcles.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] CUNGE, J.A., HOLLY, F.M., VERWEY, A. (1980) "Practical Aspects of Computational River Hydraulics" PITMAN / University of Iowa, Iowa City, USA.
- [2] VREUGDENHIL, C. (1989) "Computational Hydraulics, an introduction" - Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- [3] WIGNYOSUKARTO, B., BELLEUDY, Ph. et DELCLAUX, F. (1984) "Discharge releases in a reach of the Canal de Provence - Comparative study of real life observations and mathematical modelling results" International Conference in Hydraulic Engineering Software (HYDROSOFT) - Portoroz Yougoslavie, septembre 1984.
- [4] CHOW, V.T. (1959) "Open-Channel Hydraulics" Mc Graw Hill.
- [5] GRAF, W.H. (1996) "Hydraulique fluviale - tome 2 : Ecoulement non-permanent et phénomènes de transport" - Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
- [6] NEWSON, M.D., LEEKS, G.J. (1987) "Transport process at the catchment scale" Sediment transport in gravel bed rivers, edited by C.R. Thorne, J.C. Bathurst and R.D. Hey, John Wiley & Sons Ltd.
- [7] BRAVARD, J.-P., PETIT, F. (1997) "Les cours d'eau, - Dynamique du système fluvial" Armand Colin/Masson, Paris.
- [8] RAHUEL, J.-L. (1988) "Modélisation de l'évolution du lit des rivières alluvionnaires à granulométrie étendue" Thèse, INP de Grenoble.
- [9] SIEBEN, A. (1997) "Modelling of hydraulics and morphology in mountain rivers" Thesis, Delft University of Technology, Pays-Bas.
- [10] JAEGGI, M.N.R. (1987) "Interaction of bed load transport with bars" Sediment transport in gravel bed rivers, edited by C.R. Thorne, J.C. Bathurst and R.D. Hey, John Wiley & Sons Ltd., pp.829-844.
- [11] COUVERT, B. et al. (1999) "La gestion des rivières - Transport solide et atterrissements - Guide méthodologique" - Les études des Agences de l'Eau n°65.
- [12] PEIRY, J.-L. (1997) "Recherches en géomorphologie fluviale dans les hydrosystèmes fluviaux des Alpes du nord" Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, université Joseph Fourier, Grenoble.
- [13] DI SILVIO, G.; PEVIANI, M. (1991) "Long term equilibrium profile of mountain rivers", Proc. of XXIV IAHR Congress, Madrid, pp A501-A510.
- [14] BELLEUDY, Ph., SCHÜTTRUMPF, H. (1994) "Modélisation de l'évolution morphologique du Danube et de l'Isar" La houille blanche, N°4/1994.
- [15] BEN SLAMA, E., PERON, S., BELLEUDY, Ph., ROUAS, G. (1994) TSAR: un modèle mono-dimensionnel de simulation des évolutions des fonds alluvionnaires des rivières" La houille blanche, N°4/1994.
- [16] HEY R. D. (1987) "River dynamics, flow regime and sediment transport" Sediment transport in gravel bed rivers, edited by C.R. Thorne, J.C. Bathurst and R.D. Hey, John Wiley & Sons Ltd. pp17-42.
- [17] BELLEUDY (1998) "Restoring flow capacity in the Loire River bed" Soumis au journal Hydrological Processes.
- [18] ASCE Task Committee on Hydraulics, Bank Mechanics, and Modeling of River Width Adjustment (1998) "River Width Adjustment, I: Processes and Mechanism", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.124, N°9, pp.881-902.